

Online-Reinigung von Membranverdampferwänden in Abhängigkeit der Wärmestromdichte

Dipl.-Ing. **S. Krüger**¹, Prof. Dr.-Ing. **M. Beckmann**¹, Dr. **W. Spiegel**²,
Dr. **G. Magel**²

1 Einleitung

Hausmüll und Biomasse sind als schwierige Brennstoffe einzuordnen. Die bei der Verbrennung entstehenden staub- und gasförmigen Produkte führen u.a. zu Belägen an abgasseitigen Dampferzeugerbauteilen. Beläge haben einen negativen Einfluss auf die Effizienz und die Verfügbarkeit der Anlage, da sie zum einen Korrosionen von Verdampfer- und Überhitzerbauteilen bewirken und darüber hinaus durch isolierende Schichten auf Wärmeübertragerflächen zu höheren Abgastemperaturen führen.

Zur Verlängerung der Reisezeit der Anlage werden Online-Reinigungssysteme eingesetzt. In den verschiedenen Kesselbereichen haben sich unterschiedliche Systeme etabliert.

Zur Beurteilung der Belagsituation und somit auch als Signalgeber für die Online-Kesselreinigung eignet sich die Wärmestromdichte auf die Membranverdampferwände. Über die Entwicklung der Wärmestromdichtemesstechnik an Membranverdampferwänden wurde bereits an anderer Stelle berichtet.

In diesem Beitrag wird speziell auf die Anwendung der Wärmestromdichtemesstechnik für die Online-Kesselreinigung eingegangen. Vor diesem Hintergrund werden zunächst die Beläge in unterschiedlichen Kesselbereichen mit deren Einfluss auf die Anlageneffizienz und Verfügbarkeit beschrieben. Darauf aufbauend wird der Zusammenhang zwischen Belagsituation und Wärmestromdichte theoretisch und anhand von Beispielen dargestellt.

2 Beläge in Verbrennungsanlagen für schwierige Brennstoffe - Entstehungsorte und Belagscharakteristik

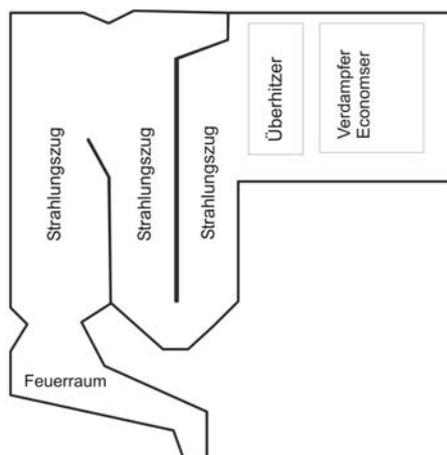


Bild 1. Kesselbereiche.

Feuerraum: Die Zustellungen (z. B. siliziumkarbidhaltige Massen und Plattensysteme mit Hintergussmassen) bzw. Auftragsschweißschichten der Membranwände des Feuerraumes (siehe Bild 1) müssen hohen Wärmestromdichten (überlagerter Wärmeübergang aus Flamm-, Gas- und Partikelstrahlung und Konvektion) standhalten (bis 200 kW/m²). Die genannten Zustellungen und Beschichtungen dienen zur Einstellung der Wärmeabgabe im Feuerraum. Aufgrund der hohen Temperaturen im Feuerraum liegen insbesondere die Alkali- und Erdalkalichloride zu einem

¹ Bauhaus-Universität Weimar, Lehrstuhl für Verfahren und Umwelt

² CheMin GmbH, Augsburg

großen Teil gasförmig vor [1] und stehen daher nur geringfügig zur Ausbildung von Belägen zur Verfügung, so dass letztere größtenteils aus lockeren Stäuben bestehen. U.u. können sich auch zentimeterdicke Verschlackungen durch Schmelzfluss bilden.

Die Membranwände im Feuerraum können prinzipiell z.B. mit Wasserlanzenbläsern, Sprühreinigungssystem oder Wandbläsern gereinigt werden [2].

Strahlungszüge: Die Wärmeabgabe vom Abgas an das Siedewasser erfolgt in den Strahlungszügen hauptsächlich über Gasstrahlung, z.T. auch über konvektiven Wärmeübergang. Die Strahlungszüge sind zumeist im Anschluss an den Feuerraum mit Zustellungen oder Cladding geschützt (Analog zum Feuerraum). Zusätzliche Wärmeübertragerflächen können



in den Strahlungszügen in Form von Verdampfer- und Überhitzerschotten installiert werden.

Mit der Wärmeübertragung vom Abgas an die Membranwände sinkt die Abgastemperatur, so dass aus dem Abgas zunehmend Alkalisalze kondensieren (siehe Bild 2). Somit werden mit voranschreitender Abgasabkühlung die Beläge an den Membranwänden zunehmend „klebriger“. Die Beläge in den kühleren Strahlungszügen können bis zu 20 Ma.-% Chlor, 10 bis 15 Ma.-% Natrium und ebensoviel Kalium enthalten.

Bild 2. Beläge auf Membranverdampferwand.

Analog zu den Membranwänden im Feuerraum können die Membranwände in den Strahlungszügen z.B. mit Wasserlanzenbläsern, Sprühreinigungssystemen oder Wandbläsern gereinigt werden [2].

Die Beläge auf den Wärmeübertragerflächen stellen einen zusätzlichen Widerstand für den Wärmeübergang vom Gas zum Wärmeträgermedium dar (siehe Bild 2). Dieser erhöhte Wärmeleitwiderstand führt zu einer Verschlechterung der Wärmeauskopplung in den Strahlungszügen des Dampferzeugers.

Überhitzer: Aus Sicht der Belags- und Korrosionssituation stellt der Überhitzer den am höchsten belasteten Kesselbereich dar. Generell sollte die Abgastemperatur vor Überhitzer 600°C nicht überschreiten. Die Belags- und Korrosionsszenarien an Überhitzerbauteilen sind Gegenstand aktueller Forschung [3], [4], [5] und werden in dieser Betrachtung nicht weiter diskutiert.

Online-Reinigungsmechanismen im Bereich des Überhitzers sind mechanische und pneumatische Klopfleinrichtungen und Rußbläsysteme. Bläsysteme - die von der Konstruktion her viel Platz im Kesselhaus benötigen - haben den Nachteil, dass sie bei falscher Betriebsweise den Grundwerkstoff durch Erosionen schädigen können [2].

Verdampfer und Economiser: Die Zusammensetzung der Beläge an den Konvektionsheizflächen der Verdampfer und Economiser variiert stark. Die Sulfatkonzentration nimmt

aufgrund von Temperaturabnahme und der damit verbundenen Schwächung der Sulfatisierungsreaktion sowie der Zunahme an Chloriden vom abgasseitigen Eintritt in den Verdampfer zum Austritt aus dem Economiser stetig ab [6].

Die Korrosionsgefahr an Economiserrohren ist - aufgrund der durch die vorausgehende Sulfatisierung der Beläge im Verdampferbereich geringen SO_3 -Konzentration im Abgas - auch bei vergleichsweise tiefer Temperatur des eintretenden Speisewassers gering.

Wie beim Überhitzer, so werden im Bereich der Konvektionsheizflächen Klopfeinrichtungen, Russbläsysteme und seltener Kugelregensysteme zur Online-Reinigung eingesetzt.

Energieeffizienz: Allgemein führen Beläge auf Wärmeübertragerflächen dazu, dass weniger Wärme an das Siedewasser übertragen wird. Somit kommt es zwangsläufig zu einer Erhöhung der Abgastemperatur, was wiederum zu einer Erhöhung der Abgasverluste führt. Eine weitere Maßnahme zur Verminderung der Abgasverluste - neben der bereits erwähnten Online-Reinigung - besteht in der Minimierung der spezifischen Abgasvolumenströme. D.h. die Verbrennung ist mit möglichst geringem Luftüberschuss zu betreiben. Hierdurch resultieren allerdings entsprechend hohe Verbrennungstemperaturen, die ihrerseits wiederum die Belagsbildung begünstigen.

Korrosion: Beläge an Verdampferwänden haben einen starken Einfluss auf die Korrosion. Hier konnte durch Untersuchungen festgestellt werden, dass bei ungünstiger Belagssituation und hohen Oberflächentemperaturen der Beläge auch deren Korrosionspotenzial ansteigt und schnell verlaufende dynamische Korrosionsvorgänge ausgelöst werden können [4]. Dies betrifft vor allem die Verdampferwände im Bereich der Feuerung und der Nachbrennzone (Strahlungszüge), da durch die entsprechend hohen Wärmestromdichten in diesen Kesselbereichen auch sehr hohe Belagstemperaturen erreicht werden.

Darüber hinaus hat eine Verschmutzung der Strahlungszüge zur Folge, dass die Abgastemperaturen vor dem Überhitzerbereich ansteigen. Diese erhöhten Temperaturen im Überhitzerbereich können bei speziellen Belagssituationen zu sehr schnell verlaufenden Korrosionen führen. Bei dieser Art der Korrosion kommt es in Folge einer blei- und zinkhaltigen Sperrschicht auf den Belägen, die sich durch Kondensation von Abgasbestandteilen an den Berührungsheizflächen bildet, unmittelbar in Rohrwandnähe zu hohen Chlor- und niedrigen Sauerstoffpartialdrücken [4]. Um diese Korrosion zu vermeiden, muss grundsätzlich die Bildung der Beläge in gefährdeten Bereichen verhindert werden bzw. ein bereits aufgebautes Belagsystem (Sperrschicht) zerstört werden.

Im Gegensatz zu den Heizflächen im Strahlungsteil gibt es für den konvektiven Teil des Kessels noch keine funktionsfähigen Reinigungsmethoden, um die oben beschriebenen Beläge mit Sicherheit und ohne die Gefahr der Schädigung des Grundwerkstoffs (Rußbläser) zu zerstören.

Eine Möglichkeit, die „wannenförmige“ Korrosion zu minimieren, besteht darin, die Abgastemperaturen vor dem Überhitzersystem unter 580 bis 600°C zu begrenzen [1]. Die im Abgas dampfförmig vorliegenden Salze können somit bei abgesenkten Abgastemperaturen vorzugsweise im Strahlungsteil des Kessels kondensieren und sich teilweise an den Wänden

ablagern, wobei in diesen Bereichen des Kessels eine vergleichsweise einfache und effektive Reinigung der Wände möglich ist.

3 Einfluss der Beläge auf die Energieeffizienz von Dampferzeugern

Wie in Abschnitt 2 dargestellt, wirkt sich ein Belag negativ auf den Wärmedurchgang vom Abgas an das Siedewasser aus, da der Belag einen isolierenden Charakter hat. Ein Maß für diesen Wärmedurchgang ist die Wärmestromdichte auf die Membranwand.

Die von Abgas an das Siedewasser abgeführte Wärmestromdichte kann als das Produkt der treibenden Temperaturdifferenz $\vartheta_{AG} - \vartheta_{SW}$ und dem effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten der Kesselwand k_{eff} dargestellt werden.

Der Wärmedurchgangskoeffizient der Kesselwand setzt sich wiederum aus

- dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{kon} ,
- dem Strahlungswärmeübergangskoeffizienten α_{str} ,
- den Wärmeleitkoeffizienten $\sum_{Wand} \frac{\lambda}{s}$ des Wandaufbaus und
- dem konvektiven Wärmeübergang auf der Rohrinenseite α_{SW}

zusammen.

Für einen beliebigen Wandaufbau kann somit eine maximal übertragene Wärmestromdichte angegeben werden:

$$\dot{q}_{max} = k_{eff} \cdot (\vartheta_{AG} - \vartheta_{SW}) \quad (1)$$

$$\dot{q}_{max} = \frac{(\vartheta_{AG} - \vartheta_{SW})}{\sum_{Wand} \left(\frac{\lambda}{s}\right)^{-1} + \sum \alpha^{-1}} = \frac{(\vartheta_{AG} - \vartheta_{SW})}{R_{sauber}} \quad (2)$$

Wird ein zusätzlicher Belag auf der Wand $\left(\sum_{Belag} \frac{\lambda}{s} = \frac{1}{R_{belegt}}\right)$ mit berücksichtigt, ergibt sich eine

niedrigere Wärmestromdichte.

Zur Darstellung des Einflusses des Belages auf die Wärmestromdichte wird das Verhältnis der Wärmestromdichten $\left(\frac{\dot{q}_{belegt}}{\dot{q}_{sauber}}\right)$ angegeben.

$$\frac{\dot{q}_{belegt}}{\dot{q}_{sauber}} = \frac{R_{sauber}}{R_{sauber} + R_{belegt}} \quad (3)$$

Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes zeigt Bild 3 beispielhaft die Auswirkung eines Belages an einer Rohrwand auf die Wärmestromdichte als Funktion der Belagsstärke für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Belages und effektive Wärmeübergangskoeffizienten.

Bild 3 zeigt, dass der Einfluss des Belages auf die übertragene Wärmestromdichte bei hohen abgasseitigen Wärmeübergangskoeffizienten ($\alpha_{\text{au\ss en}} = 200 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) stärker ist, als bei niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten. Beispielsweise bewirken 3 mm Belag ($\lambda_{\text{Belag}} = 0,3 \text{ W}/(\text{mK})$) bei einem abgasseitigen Wärmeübergangskoeffizienten von $200 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ein Absinken der übertragenen Wärmestromdichte auf 30% des Ausgangswertes. Der gleiche Belag führt bei einem abgasseitigen Wärmeübergangskoeffizienten von $50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nur zu einem Absinken der übertragenen Wärmestromdichte auf 70 % des Ausgangswertes. Durch das starke Absinken der Wärmestromdichte in Kesselbereichen mit hohen abgasseitigen Wärmeübergangskoeffizienten bei Belägen mit niedriger Wärmeleitfähigkeit ist es nicht ohne weiteres möglich, den sauberen Anfahrzustand der Anlage durch Online-Reinigung dauerhaft zu erreichen. Eine dünne Belagsschicht würde sich schon nach sehr kurzer Betriebszeit wieder ausbilden und die Wärmestromdichte deutlich senken.

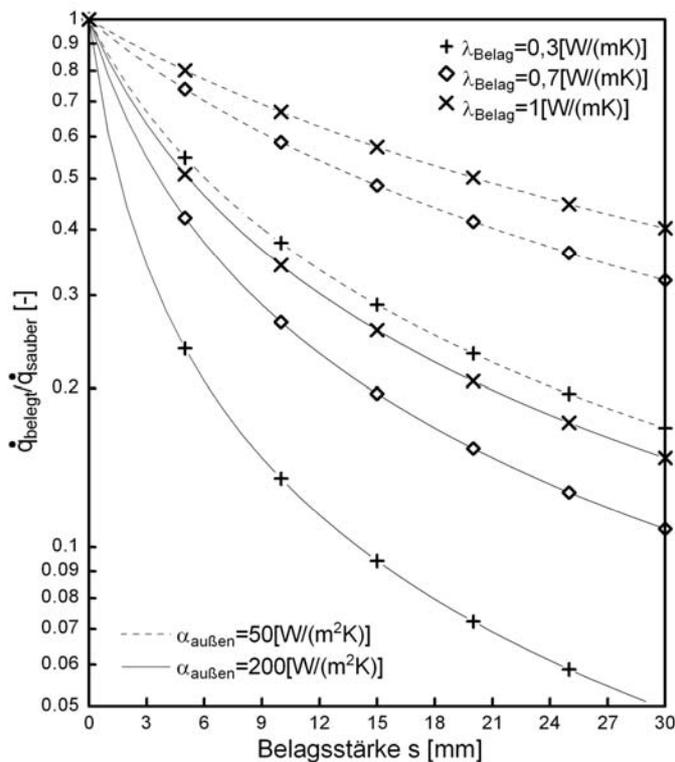


Bild 3. Einfluss eines Belages auf die Wärmestromdichte.

führt im Fall niedriger Wärmeübergangskoeffizienten zu einer Verminderung der Wärmestromdichte von 60 auf 45 % des Ausgangswertes. Hinsichtlich der Online-Reinigung von Membranverdampferwänden in den Strahlungszügen kann zusammengefasst werden, dass

- eine Reinigung in Kesselbereichen hoher Wärmeübergangskoeffizienten (z.B. 1. Strahlungszug) effektiver auf die Abgaskühlung in den Strahlungszügen wirkt, als das Entfernen der Beläge in Kesselbereichen mit niedrigeren Wärmeübergangskoeffizienten,
- eine Reinigung nicht bzw. nur für kurze Zeit den Betriebszustand des sauberen Kessels (Zustand nach Reinigung im Stillstand) wieder herstellt.

Haben die Beläge eine bestimmte Schichtdicke überschritten, so ist aus dem Verlauf der in Bild 3 gezeigten Kurven zu sehen, dass - bezogen auf den Ausgangszustand - keine wesentliche Änderung der Wärmestromdichte mehr eintritt. Bei einem Anwachsen der Beläge (mit $\lambda_{\text{Belag}} = 0,3 \text{ W}/(\text{mK})$) von 15 auf 30 mm im Fall hoher Wärmeübergangskoeffizienten wird die übertragene Wärmestromdichte nur noch von 10 auf 5 % des Ursprungswertes gemindert. Die gleiche Änderung der Belagsstärke (mit $\lambda_{\text{Belag}} = 0,3 \text{ W}/(\text{mK})$)

führt im Fall niedriger Wärmeübergangskoeffizienten zu einer Verminderung der Wärmestromdichte von 60 auf 45 % des Ausgangswertes. Hinsichtlich der Online-Reinigung von Membranverdampferwänden in den Strahlungszügen kann zusammengefasst werden, dass

4 Beispiele für den Einfluss des Belages auf die Wärmestromdichte

Im Folgenden werden Messwerte von Wärmestromdichtemessungen aus einer Abfallverbrennungsanlage und einer Biomasseverbrennungsanlage diskutiert, die den Einfluss des Belages auf die Wärmestromdichte zeigen.

Die Entwicklung einer nicht invasiven Messtechnik zur Bestimmung der Wärmestromdichte auf Membranverdampferwände ist Gegenstand eines derzeitigen DBU-Projektes (DBU 23893-24) [7].

Über die Messung von Temperaturdifferenzen in der abgasabgewandten Membranwandseite (zwischen Scheitel- und Stegtemperatur) können für den Wärmefluss repräsentative Signale erhalten werden. Die Bestimmung der Differenztemperatur erfolgt mit geringem messtechnischen Aufwand und hoher Genauigkeit durch Nutzung des Membranwandmaterials als Teil zweier gegeneinander geschalteter Thermoelemente.

Diese Messtechnik gestattet hohe orts- und zeitaufgelöste Informationen über die lokale Wärmestromdichte.

Bild 4 zeigt das Messsignal einer Wärmestromdichtemessung an einer Abfallverbrennungsanlage. Der Installationsort befindet sich im Übergang vom Feuerraum zum ersten Strahlungszug (siehe auch Bild 1). Über einen Zeitraum von 18 Stunden nimmt das Messsignal stetig von 160 auf 60 kW/m² ab, bis es sprunghaft erneut auf 160 kW/m² ansteigt. In diesem Zeitraum ist die Dampflast und Feuerraumtemperatur der Anlage konstant geblieben, so dass unter Annahme einer konstanten Wärmeleitfähigkeit (0,7 W/(mK)) und gleich bleibenden abgasseitigen Wärmeübergangsbedingungen die Belagsstärke berechnet werden kann.

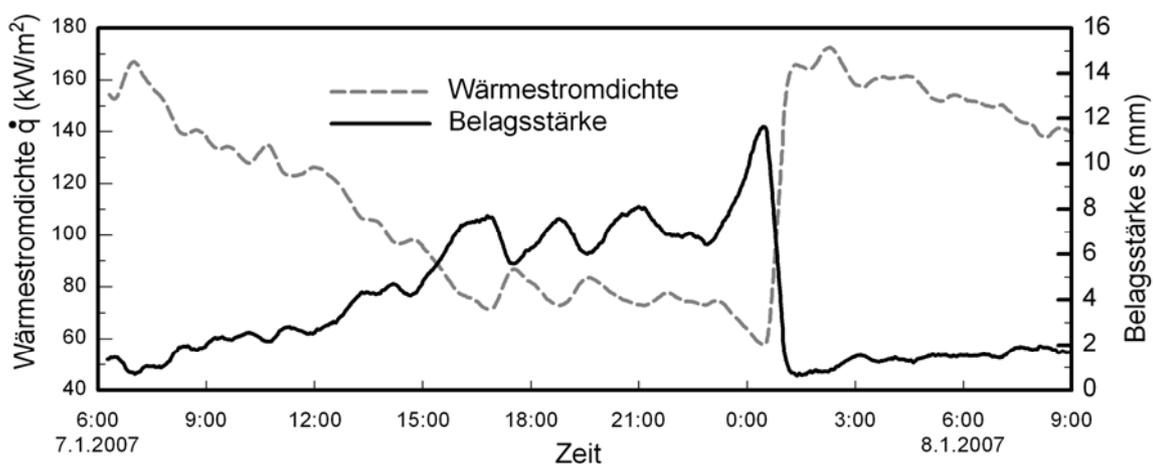


Bild 4. Übertragene Wärmestromdichte und berechnete Belagsstärke.

Das sprunghafte Ansteigen der Wärmestromdichte tritt aufgrund des schlagartigen Abfallens von Belägen ein. Ein solches plötzliches Abfallen von Belägen ist typisch bei nitridgebundenen SiC-Platten im Bereich hoher Wärmestromdichten. Aus Bild 4 ist – wie anhand der theoretischen Ergebnisse (siehe Abschnitt 3) gezeigt – zu sehen, dass ein Anwachsen der Belagsstärke bei geringen Belagsschichtdicken (z.B. von 1 auf 4 mm Belagsstärke) ein stär-

keres Abfallen der Wärmestromdichte bewirkt, als ein Anwachsen der Belagsschicht bei bereits vorhandenen Belägen (z.B. von 5 auf 11 mm Belagsstärke).

Bei den im Folgenden gezeigten und diskutierten Daten aus einer Biomasseverbrennungsanlage wird speziell auf die Wirkung der Online-Reinigung auf die Messsignale der Wärmestromdichtemessung eingegangen.

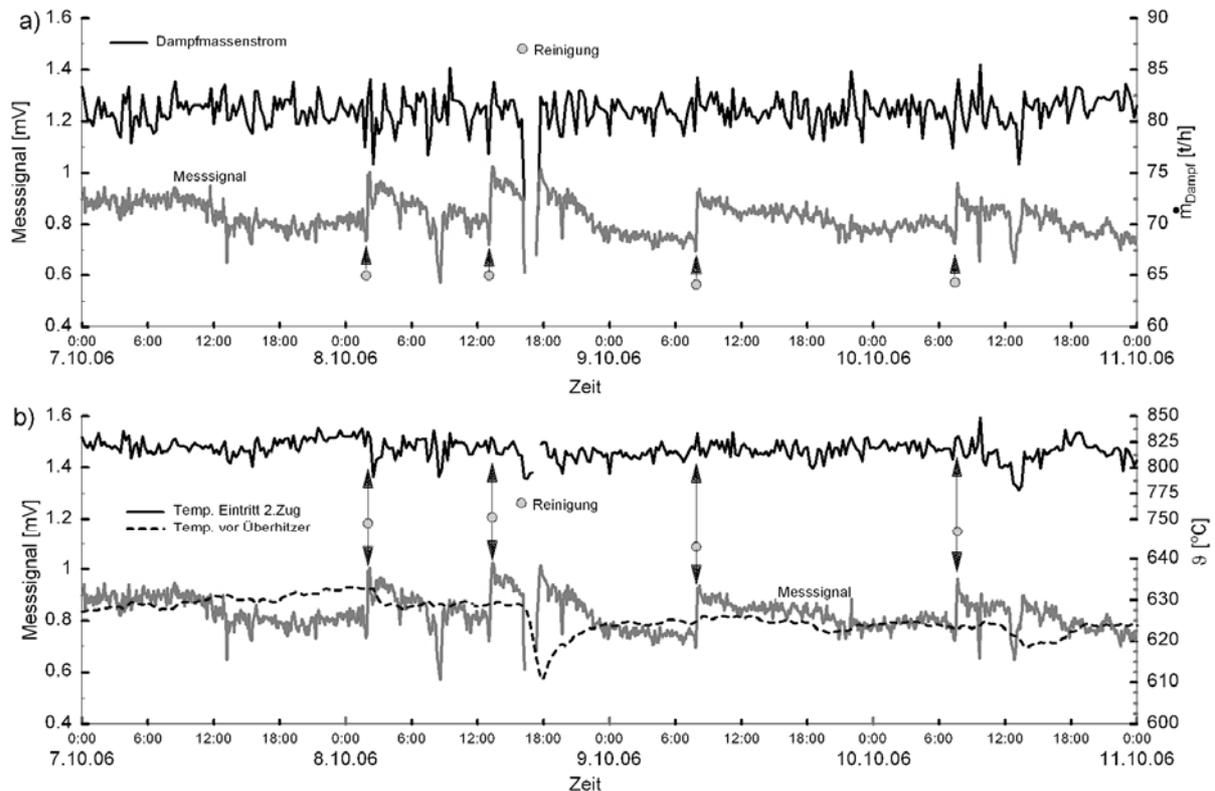


Bild 5. Einfluss der Online-Reinigung auf die Signale der Wärmestromdichtemessung.

Die Bilder 5a und b zeigen deutlich die Auswirkung der Online-Reinigung auf das Messsignal einer Messstelle, die im Bereich des Feuerraumes installiert ist. Mit dem Reinigungszyklus steigen die Messsignale abrupt und simultan an.

Nach den Reinigungen nehmen die Messsignale wieder ab, was auf ein Anwachsen eines Belages auf der Membranverdampferwand schließen lässt. Hierbei ist zu erkennen, dass das Signal der Wärmestromdichtemessung kurz nach der Reinigung relativ stark und im weiteren Verlauf zunehmend flacher abfällt. Dieser Zusammenhang wurde bereits anhand der theoretischen Ergebnisse (siehe Abschnitt 3) vorausgesagt.

In vielen Fällen wird die Gastemperatur vor Überhitzer und der Dampfmassenstrom für die Beurteilung des Verschmutzungszustandes eines Dampferzeugers verwendet. Prinzipiell ist der Dampfmassenstrom als Führungsgröße für die Online-Reinigung geeignet, da bei Anwachsen von Belägen auf Wärmeübertragerflächen die Dampfproduktion nachlässt. Dieser Parameter wird jedoch häufig als Führungsgröße von der Feuerungsleistungsregelung durch Regelung des Brennstoffmassenstroms konstant gehalten. D.h. eine belagsbedingte Verminderung der Dampfproduktion wird durch einen höheren Brennstoffmassenstrom ausge-

glichen, was zwangsläufig zu einer Erhöhung der Abgastemperatur vor Überhitzer führt. Dieser Effekt wird jedoch bei großzügig ausgelegten Kesselanlagen gedämpft, so dass der Dampfmassenstrom und die Temperatur vor Überhitzer nur bedingt als Führungsgrößen für die Online-Reinigung geeignet sind. Darüber hinaus haben der Dampfmassenstrom und die Gastemperaturen vor Überhitzer bezüglich der Belagssituation naturgemäß einen integralen Charakter, d.h. es kann anhand dieser Parameter keine Aussage über den genauen Ort der Belagsbildung gemacht werden.

5 Zusammenfassung

Die Verbrennung von Abfall und Biomasse führt zu abgasseitigen Belägen auf Wärmeübertragerflächen, die abhängig von der Abgastemperatur, Rohgaskomponenten usw. charakteristische Zusammensetzungen aufweisen. Diese Beläge sind Ursache für Korrosionen, die die Verfügbarkeit der Anlagen reduzieren. Darüber hinaus beeinträchtigen sie die Anlageneffizienz, da ein zusätzlicher Wärmeleitwiderstand auf den Wärmeübertragerflächen gebildet wird.

Der Einfluss des Belages ist abhängig von der Intensität des effektiven abgasseitigen Wärmeübergangs. In Kesselbereichen mit hohen Wärmestromdichten ist der Einfluss des Belags stärker, als in Bereichen niedrigerer Wärmestromdichten. Somit folgt, dass sich eine Online-Reinigung von Kesselbereichen mit hohen Wärmestromdichten effektiver auf die Abgaskühlung bzw. die Verbesserung der Wärmeabgabe von Abgas an das Siedewasser auswirkt.

Zur Bestimmung der abgasseitigen Belagssituation von Membranverdampferwänden kann die Wärmestromdichte als Messgröße verwendet werden. Beispiele von Wärmestromdichtemessungen verdeutlichen den Zusammenhang zwischen Wärmestromdichte und Belagssituation bzw. den Einfluss der Online-Reinigung auf die Wärmestromdichte.

Danksagung:

Wir bedanken uns bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die finanzielle Unterstützung bei dem Projekt (Aktenkennzeichen: 23893-24) *Entwicklung eines Messsystems für die Online-Bestimmung des Wärmestromes auf Membranwände von Dampferzeugern in Biomasseverbrennungsanlagen.*

6 Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

k	W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient
\dot{m}	t/h	Massenstrom
\dot{q}	kW/m ²	Wärmestromdichte
R	(m ² K)/W	Wärmeleitwiderstand
s	m	Abstand, Weg

Griechische Symbole

α	W/(m ² K)	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
λ	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
ϑ	°C	Temperatur

Indices

AG	Abgas	max	maximal
außen	Feuerraumseite	sauber	sauberer Zustand der Wand
belegt	belegter Zustand der Wand	str	Strahlung
eff	effektiv	SW	Siedewasser
kon	konvektiv		

7 Literaturangaben

- [1] Born, M.: Dampferzeugerkorrosion und Möglichkeiten ihrer Begrenzung. Optimierung der Abfallverbrennung 1, TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2004, ISBN 3-935317-16-6.
- [2] Vodegel, S.; Harpeng, J.: Online-Kesselreinigung in Müllverbrennungsanlagen – Systeme und Belageigenschaften–. Optimierung der Abfallverbrennung 2, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, ISBN: 3-935317-19-0.
- [3] Spiegel, W.; T. Herzog, T.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Dynamische chlorinduzierte Hochtemperaturkorrosion von Verdampfer- und Überhitzerbauteilen aufgrund spezieller Belagsentwicklungen - häufiger Befund in Abfall- und Biomassegefeuerten Dampferzeugern. VGB PowerTec, Ausgabe 1/2 2005, Seite 89-97.
- [4] Spiegel, W.; Müller, W.; Herzog, T.: Beeinträchtigung der Wirtschaftlichkeit von Abfallverbrennungsanlagen durch Korrosion –Nutzen aus korrosionsmindernder Betriebsweise–. Optimierung der Abfallverbrennung 2, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, ISBN: 3-935317-19-0.
- [5] Warnecke, R.: Einfluss von Strömung und chemischen Reaktionen im rauchgasseitigen Belag auf Korrosionen an Überhitzer-Rohren in Müllverbrennungsanlagen. VGB PowerTech, 09/2004.
- [6] Pfrang-Stotz, G.; Reichelt, J.; Seifert, H.: Belagsbildung und Korrosion in Abfallverbrennungsanlagen. Optimierung der Abfallverbrennung 1, TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2004, ISBN 3-935317-16-6.
- [7] Beckmann, M.; Krüger, S.; Spiegel, W.; Magel, G.: Online-Bestimmung des Wärmestromes auf Membranverdampferwände von Dampferzeugern. Energie aus Abfall, Band 2, TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, ISBN 976-3-935317-26-9.